

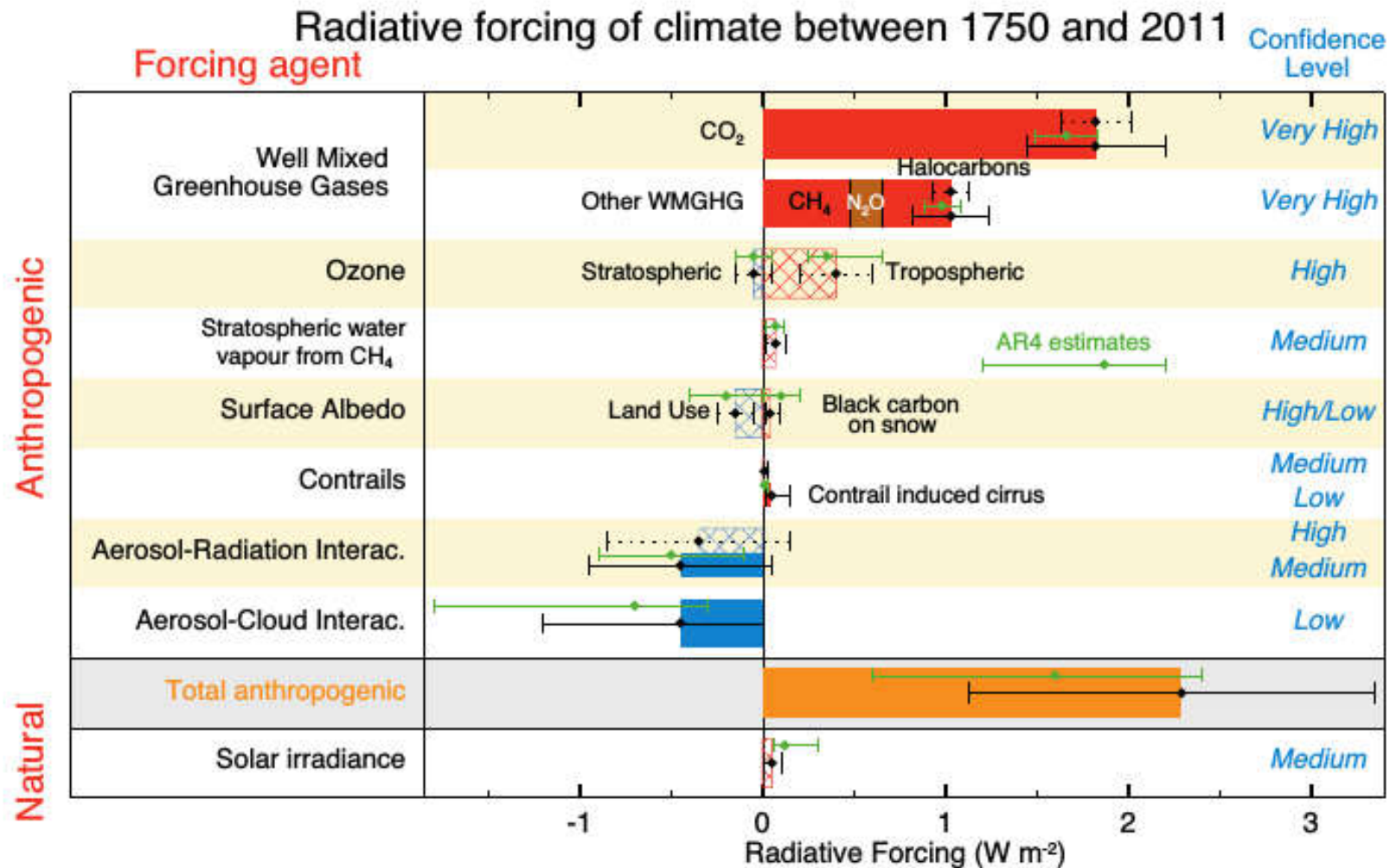
Die Rolle der Ozon-Strahlungs-Rückkopplung für die Klimasensitivität

Michael Ponater
Simone Dietmüller
Vanessa Rieger

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany.*



Strahlungsantrieb: Vergleichsmetrik für verschiedene Beiträge zur totalen Klimaänderung



Strahlungsantrieb, Strahlungsrückkopplung, Klima-Response und Klimasensitivität

Der **Klimasensitivitätsparameter** (λ) ist ein Maß für die Stärke der globalen **Bodentemperaturänderung** (ΔT_S) als Reaktion auf einen externen **Strahlungsantrieb** (RF):

$$\Delta T_S = \lambda \cdot RF$$

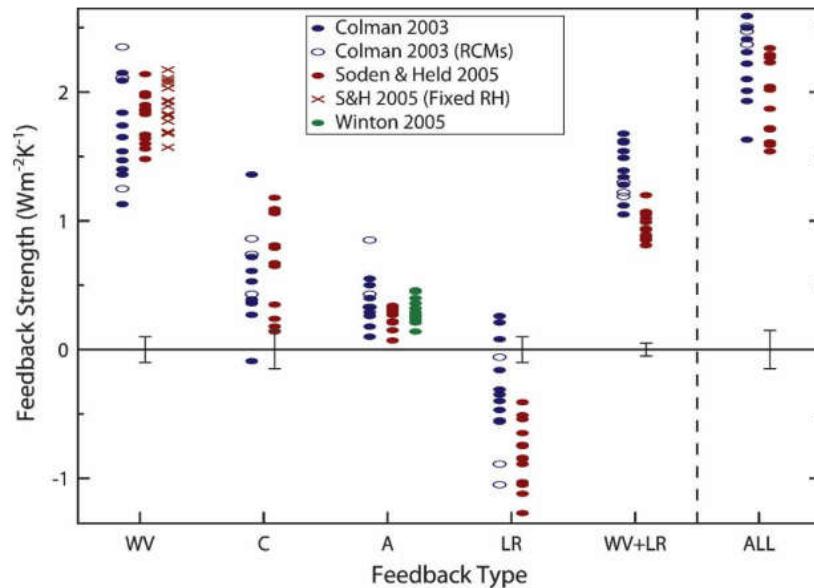
λ wird durch eine Anzahl von im Klimasystem wirkenden **Strahlungsrückkopplungen** (α_x) bestimmt:

$$-\frac{1}{\lambda} = \alpha = \sum \alpha_x$$

Diese Rückkopplungen können (so wie auch λ) mit der Art des Strahlungsantriebs variieren und zeigen teilweise auch eine markante Abhängigkeit vom verwendeten Klimamodell.



Physikalische Rückkopplungen (Modelle – Beobachtungen)

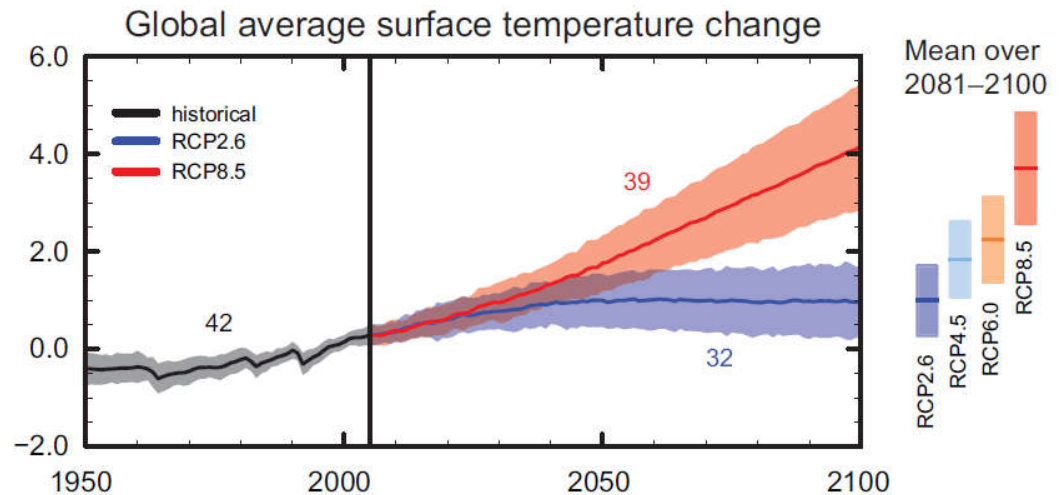


Physikalische Rückkopplungen (speziell die Wolken- Strahlungs-Rückkopplung) sind in unterschiedlichen Klimamodellen von unterschiedlicher Stärke.

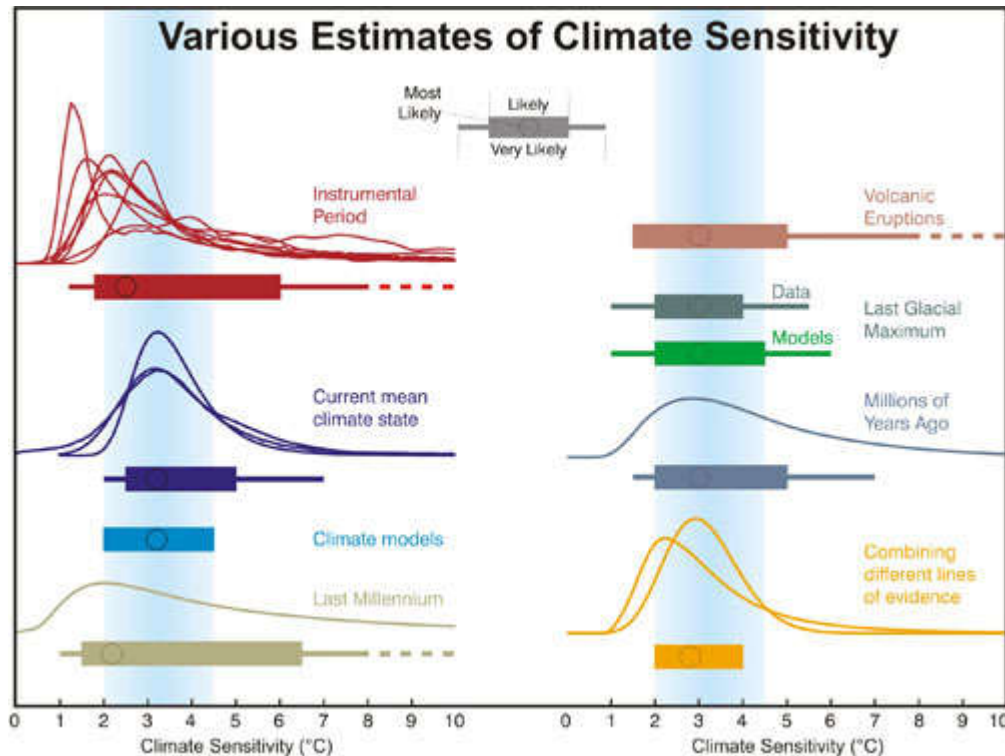
← Beispiel: Bony et al. (2006)

Daraus ergibt sich eine entsprechende Modell-zu-Modell Schwankung des Klimasensitivitätsparameters.

Aus diesem Grund simulieren die Klimamodelle unterschiedliche Klimaentwicklungen, selbst wenn das betrachtete Szenario der zukünftigen Strahlungsantriebe gleich vorgegeben wird (IPCC AR5, 2013).

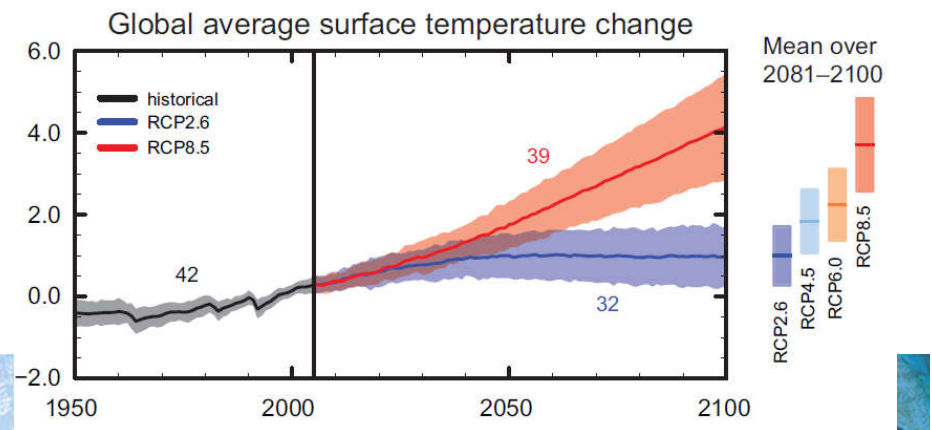
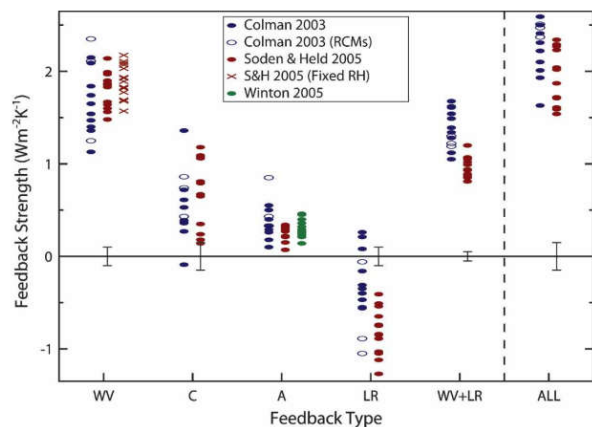


Physikalische Rückkopplungen (Modelle – Beobachtungen)



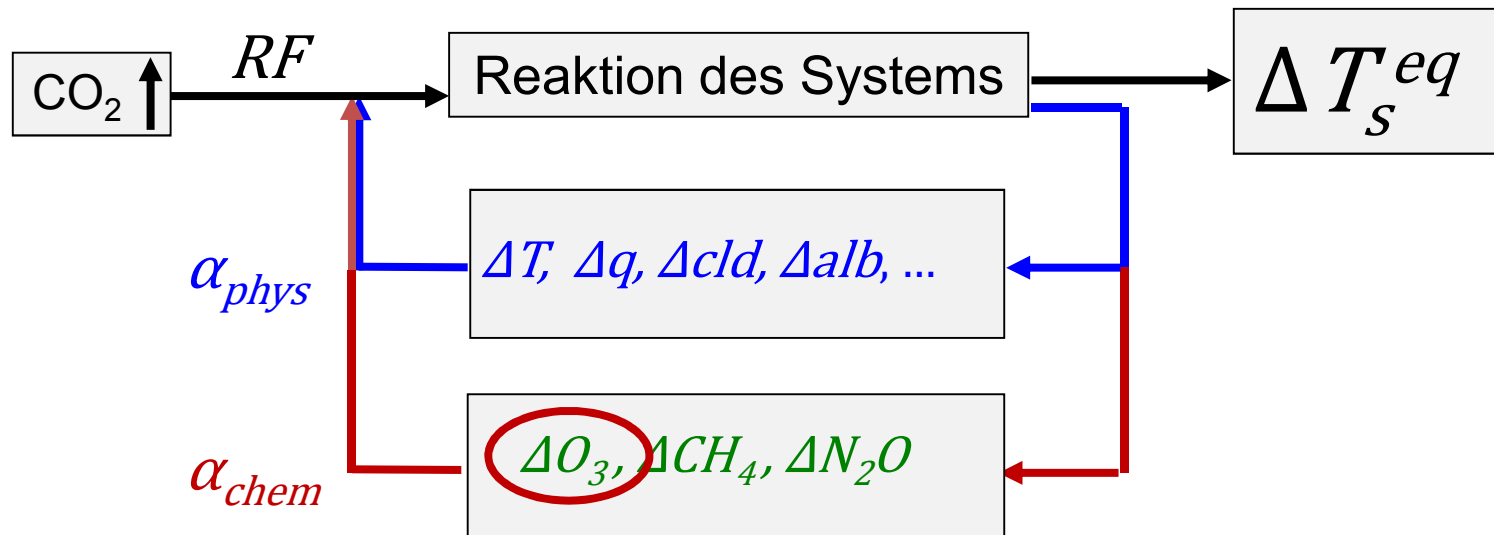
Eine „beobachtete Klimasensitivität“ lässt sich bisher nicht mit einer so hinreichenden Genauigkeit angeben, als dass daraus ein „Normwert“ für die Klimamodelle angegeben werden könnte.

← nach Knutti und Hegerl (2008)



Zusätzliche chemische Rückkopplungen

Beispiel: Klimaänderung durch einen CO₂-Strahlungsantrieb



$$\alpha = \sum_x \alpha_x = \alpha_{pla} + \alpha_q + \alpha_{LR} + \alpha_{alb} + \alpha_{cld} + \dots$$

$$\dots + \alpha_{O_3} + \alpha_{CH_4} + \alpha_{N_2O} + \alpha_{FCKW} + \alpha_{Aero} \dots$$



ECHAM5/Messy Atmospheric Chemistry Model EMAC

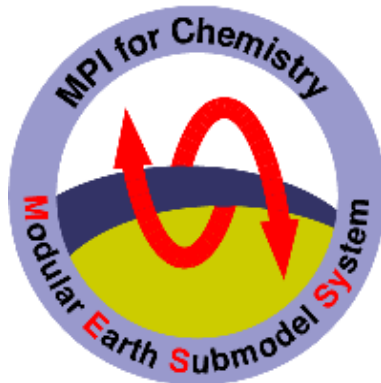
ECHAM = ECMWF-model, HAMBURG version

Atmosphärisches Zirkulationmodell

Referenz: Roeckner et al. (2004), MPI-Report No.349

MESSy = Modular Earth Submodel System

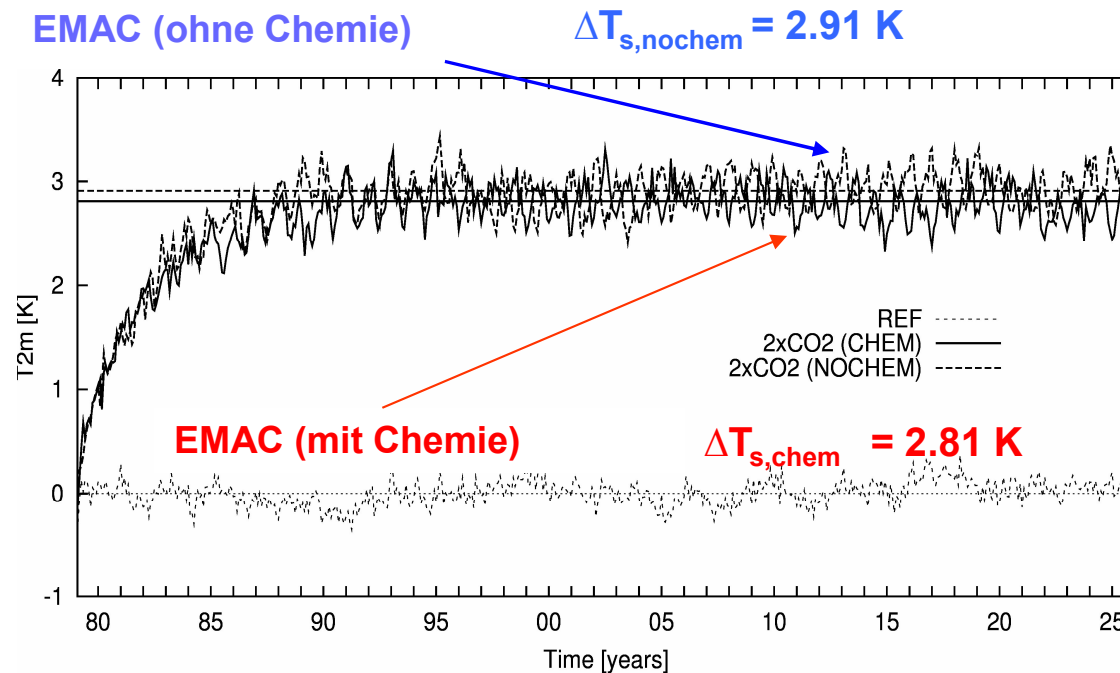
Referenz: Jöckel et al., ACP 2005



- Schnittstelle und geeignete Infrastruktur zur Ankopplung von Prozessen an ein Basismodell der atmosphärischen Zirkulation
- Satz von Prozessen als zuschaltbarer Submodelle
- Einheitlicher Kodierungsstandard



CO₂ Klimaantrieb: Interaktive Chemie dämpft Klimasensitivität



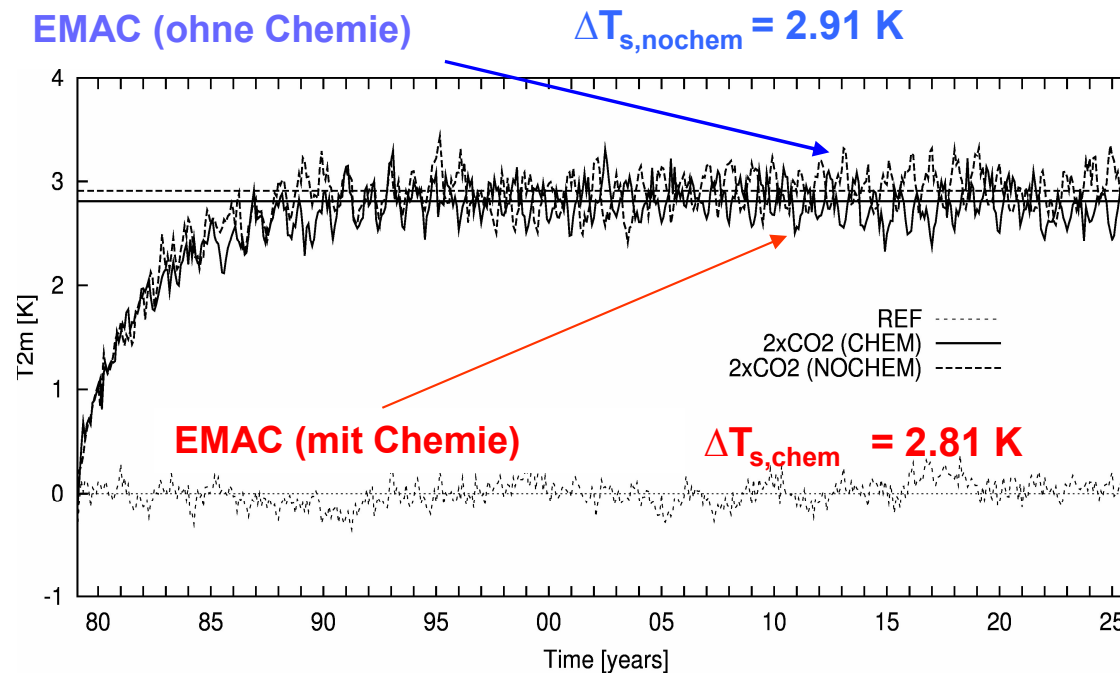
Signifikante Reduktion der Klimasensitivität durch chemische Rückkopplungen von **~3.5 % (2xCO₂)** bzw. **~8.5 % (4xCO₂)**

Bei größerem Strahlungsantrieb sinkt die (statistische) Unsicherheit

(Dietmüller et al.. 2014)

Simulation		RF Wm ⁻²	Chemie	Klimasensitivität λ (K/Wm ⁻²)	
				Mittel	[95% Konfid.]
75 ppmv CO ₂ -Erhöhung	+75CO ₂	1.06	nein	0.73	[0.67; 0.79]
			ja	0.63	[0.57; 0.68]
Verdoppelung von CO ₂	2xCO ₂	4.13	nein	0.70	[0.69; 0.72]
			ja	0.68	[0.66; 0.69]
Vervierfachung von CO ₂	4xCO ₂	8.93	nein	0.91	[0.90; 0.92]
			ja	0.84	[0.83; 0.85]

CO₂ Klimaantrieb: Interaktive Chemie dämpft Klimasensitivität



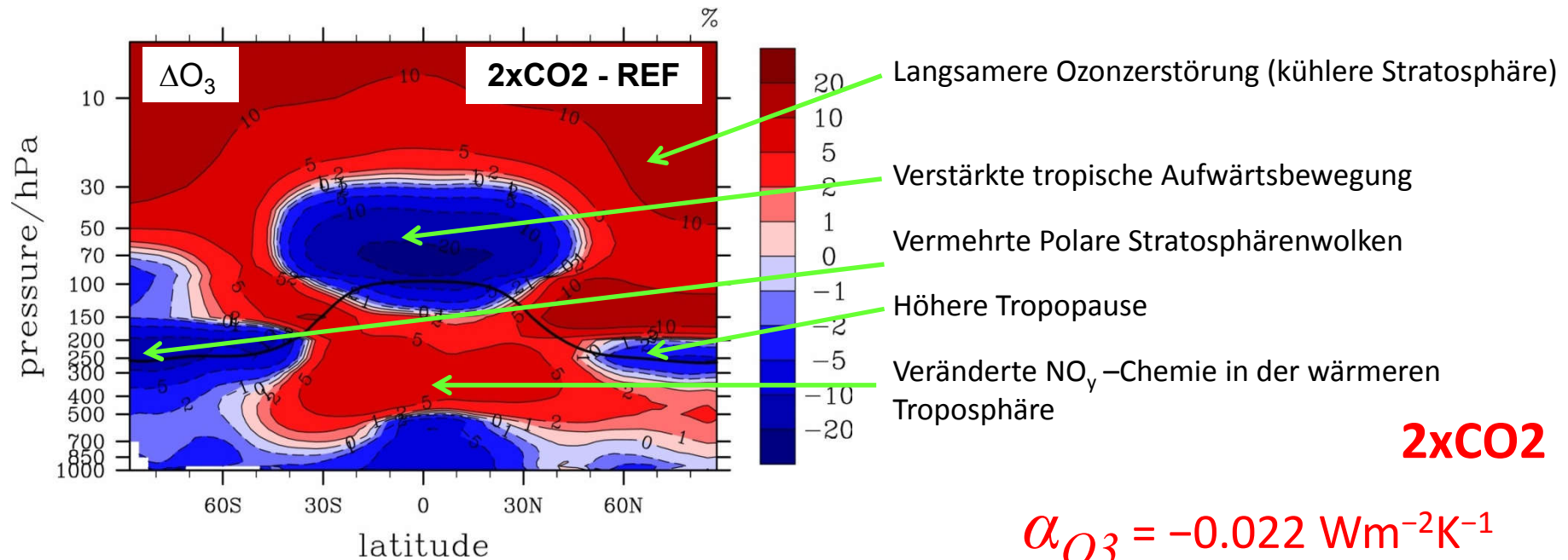
Signifikante Reduktion der Klimasensitivität durch chemische Rückkopplungen von **~3.5 % (2xCO₂)** bzw. **~8.5 % (4xCO₂)**

Bei größerem Strahlungsantrieb sinkt die (statistische) Unsicherheit

(Dietmüller et al.. 2014)

Simulation		RF Wm ⁻²	Chemie	Klimasensitivität λ (K/Wm ⁻²)	
				Mittel	[95% Konfid.]
75 ppmv CO ₂ -Erhöhung	+75CO ₂	1.06	nein	0.73	[0.67; 0.79]
			ja	0.63	[0.57; 0.68]
Verdoppelung von CO ₂	2xCO ₂	4.13	nein	0.70	[0.69; 0.72]
			ja	0.68	[0.66; 0.69]
Vervierfachung von CO ₂	4xCO ₂	8.93	nein	0.91	[0.90; 0.92]
			ja	0.84	[0.83; 0.85]

Klimaantrieb CO₂: Negative Ozon-Strahlungsrückkopplung



2xCO₂

$$\alpha_{O_3} = -0.022 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

EMAC Dietmüller et al. (2014)

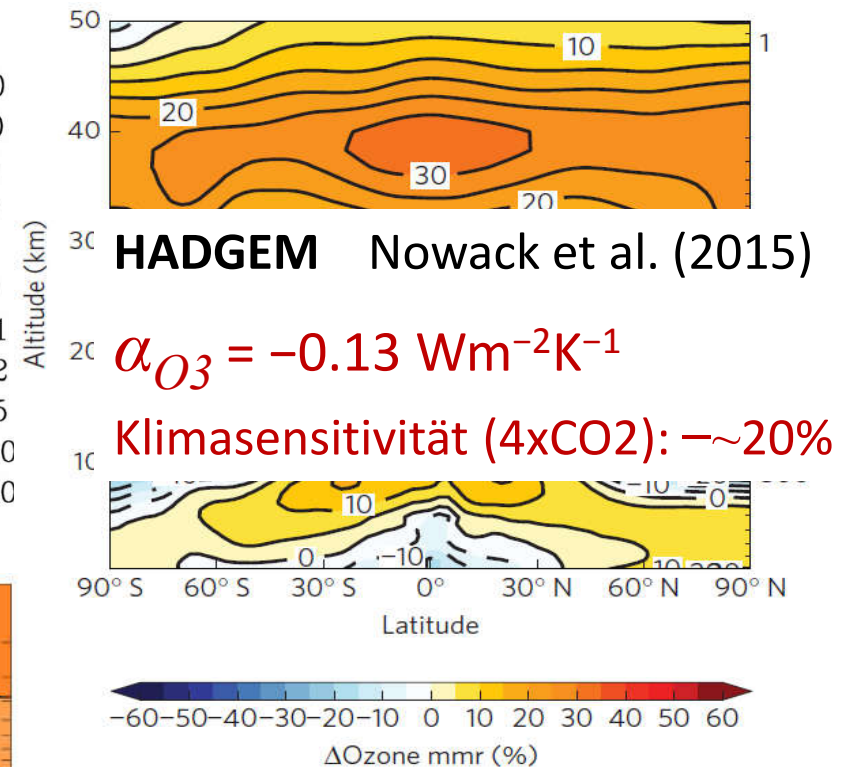
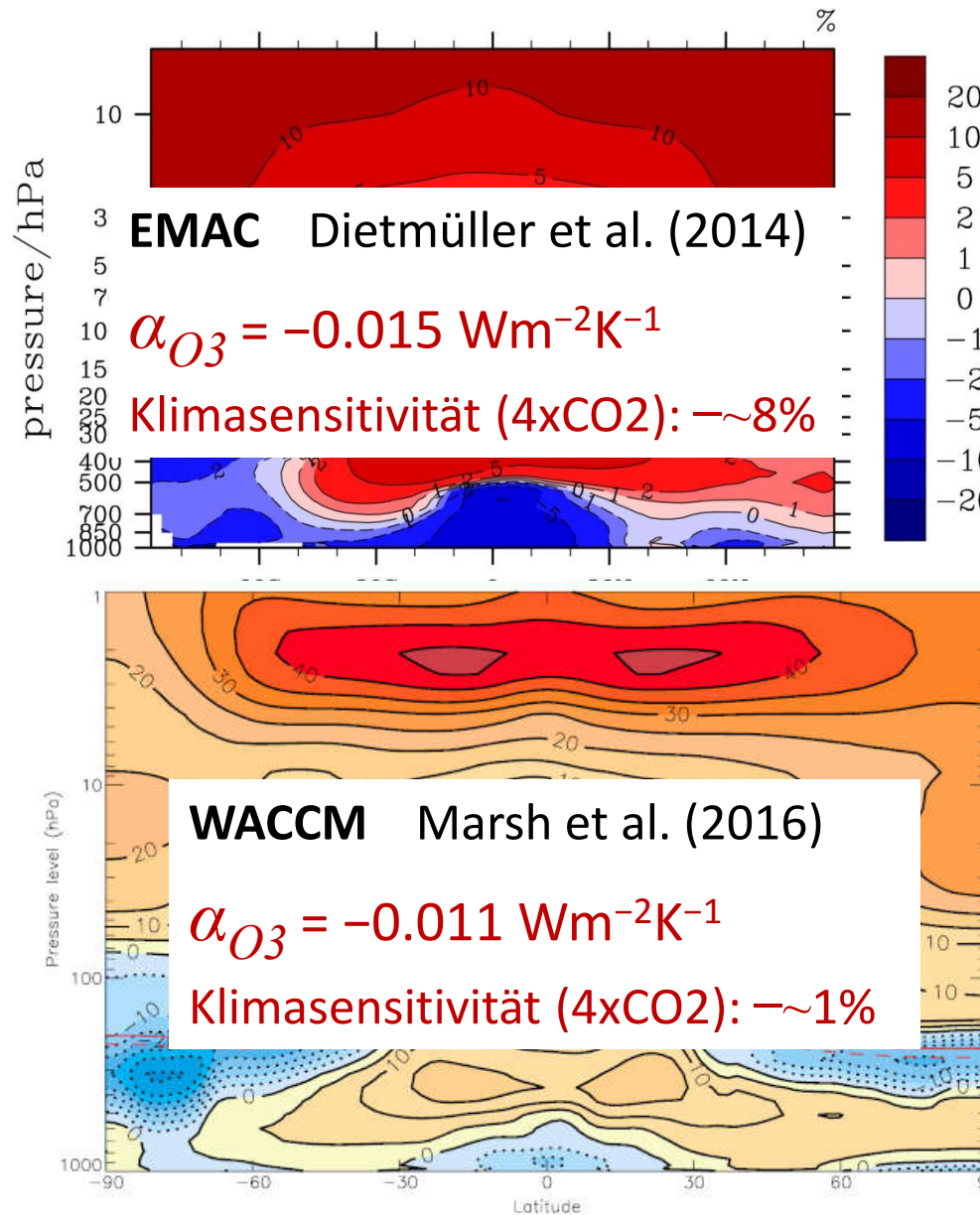
4xCO₂

$$\alpha_{O_3} = -0.015 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Die verringerte Klimasensitivität bei Einführung einer interaktiven Atmosphärenchemie erklärt sich konsistent als Folge einer negativen Ozon-Strahlungs-Rückkopplung.



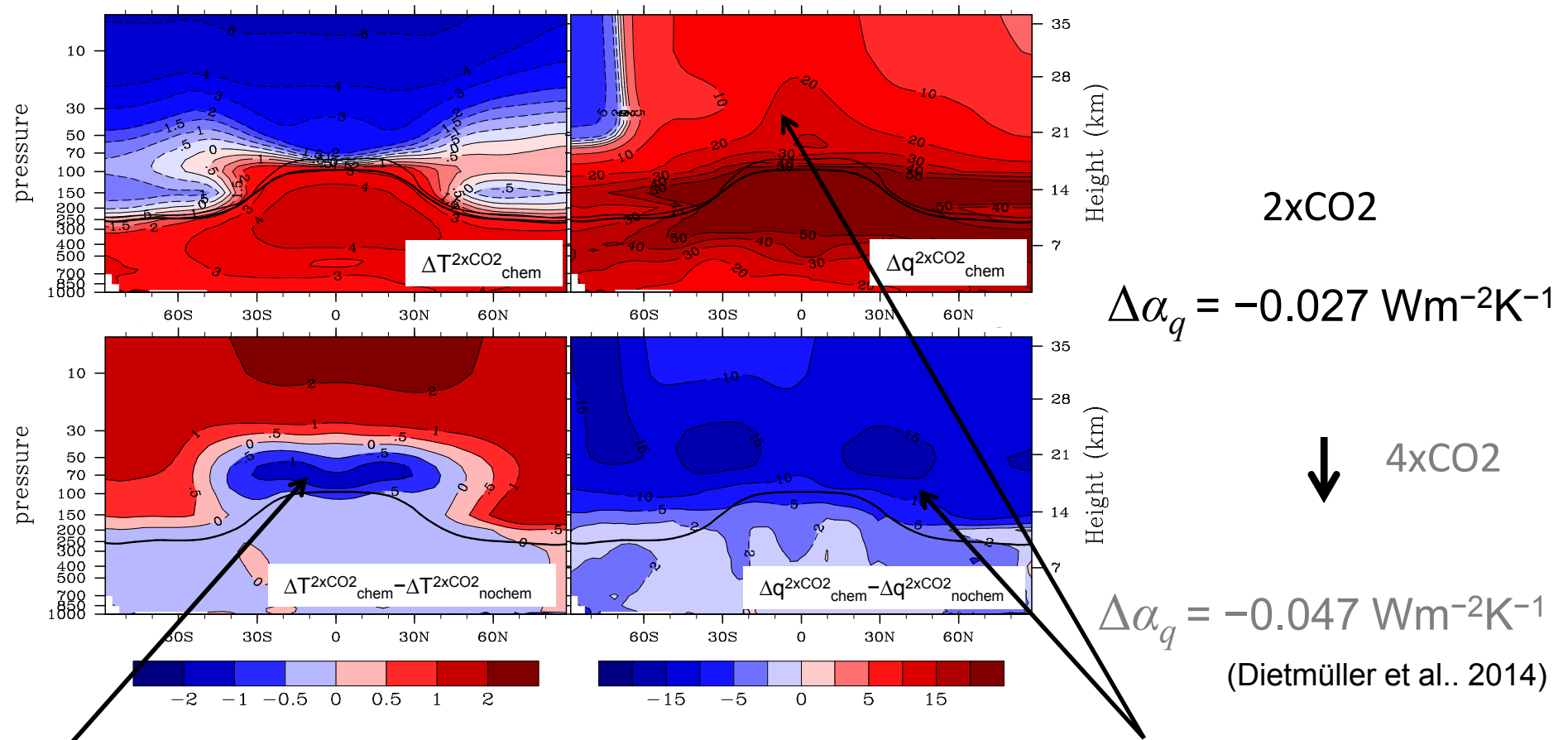
Klimaantrieb CO₂: Negative Ozon-Strahlungsrückkopplung



Das Muster der Ozonrückkopplung ist von Modell zu Modell robust, die Strahlungsrückkopplung und der Einfluss auf die Klimasensitivität nicht!



Interaktives Ozon reduziert die positive SWV Rückkopplung



Ozonrückkopplung führt zu geringerer Erwärmung an der tropischen "cold point" Tropopause.

Stratosphärische Wasserdampfzunahme und die dadurch verursachte Strahlungs-Rückkopplung sind reduziert.



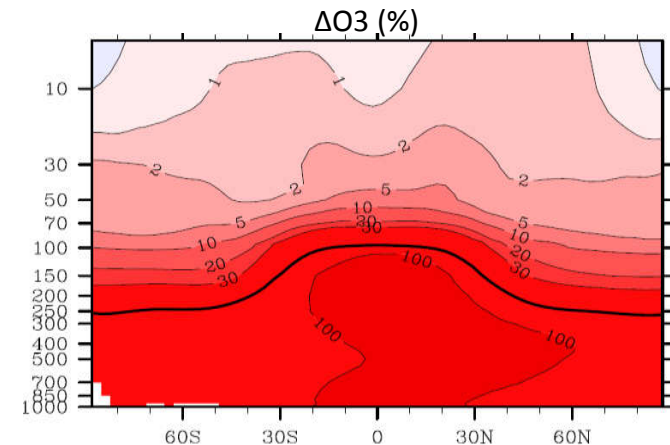
Nicht-CO₂ Strahlungsantrieb: Ozonzunahme (ΔO_3) durch erhöhte NO_x und CO Bodenemissionen

Hier ergibt sich eine noch größere (negative) Ozon-Strahlungs-Rückkopplung (im Vergleich zu einem CO₂ RF von annähernd gleicher Stärke):

$$\alpha_{O_3} = -0.166 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Jedoch **erhöht** sich hier die Klimasensitivität in der Modellsimulation mit interaktive Chemie!

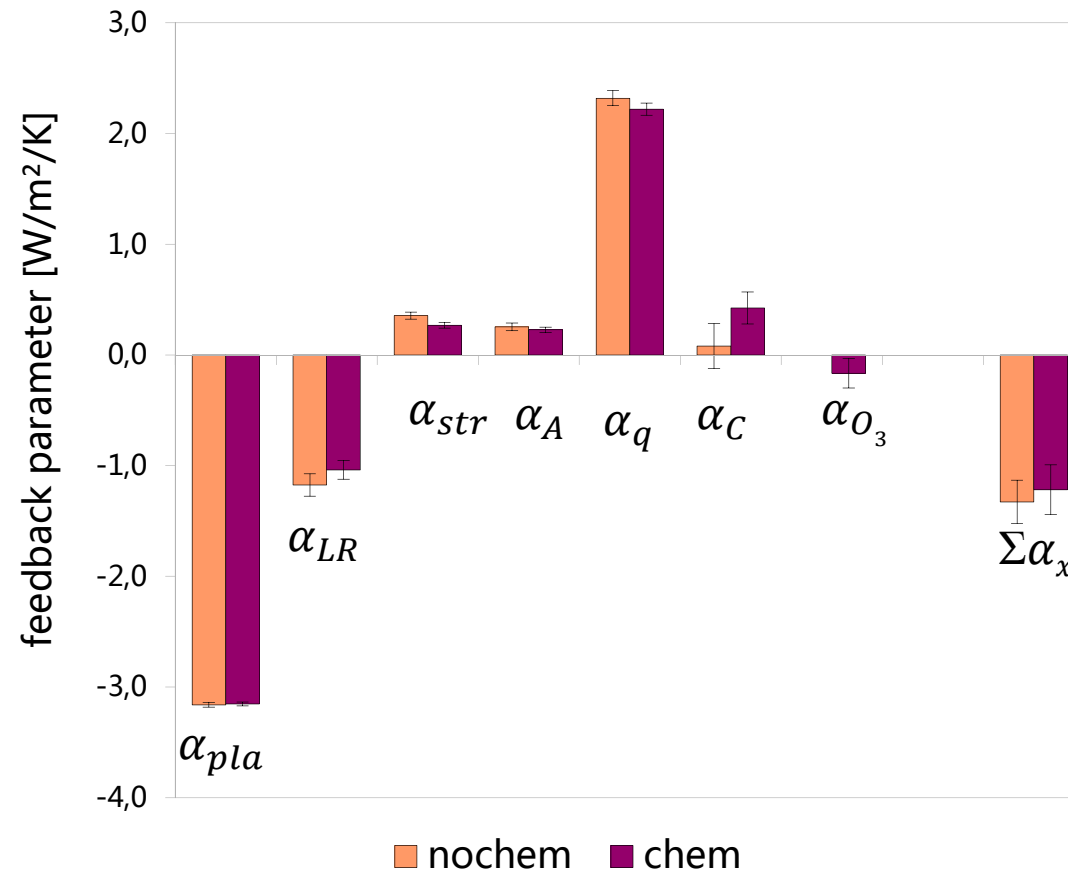
(Dietmüller, 2011)



Simulation		RF Wm ⁻²	Chemie	Klimasensitivität λ (K/Wm ⁻²)	
				Mittel	[95% Konfid.]
Ozonzunahme durch höhere NOx+CO Bodenemissionen	NOX+CO	1.22	nein	0.62	[0.55; 0.68]
			ja	0.69	[0.65; 0.73]
75 ppmv CO ₂ increase	+75CO2	1.06	nein	0.73	[0.67; 0.79]
			ja	0.63	[0.57; 0.68]
Doubling of CO ₂	2xCO2	4.13	nein	0.70	[0.69; 0.72]
			ja	0.68	[0.66; 0.69]
Quadrupling of CO ₂	4xCO2	8.93	nein	0.91	[0.90; 0.92]
			ja	0.84	[0.83; 0.85]



Nicht-CO₂ Strahlungsantrieb: Ozon-Strahlungs-Rückkopplung überkompensiert durch Änderung physikalischer Rückkopplungen



Vollständige Rückkopplungsanalyse ergibt:

- Negative Ozon-Strahlungs-Rückkopplung in der NOX/CO-Simulation mit interaktiver Chemie
- Summe aller Rückkopplungen *weniger* negativ in NOX+CO_{chem}, konsistent mit einer höheren Klimasensitivität im Vergleich zu NOX+CO_{nochem}.
- Wolken-Rückkopplung (α_C) nimmt bei Zulassung chemischer Rückkopplungen signifikant zu.

Rieger (2014), Rieger et al. (2017)



Zusammenfassung

- Negative Ozon-Strahlungs-Rückkopplung in CO₂-getriebenen Klimaänderungssimulation mit interaktiver Chemie (robust).
- Die negative Ozon-Strahlungs-Rückkopplung reduziert die Klimasensitivität in CO₂-Simulationen signifikant (modellabhängig).
- Grund der Modellunterschiede könnte eine unterschiedlich starke Kopplung der Rückkopplungen von Ozon und stratosphärischem Wasserdampf sein (tbc).
- Wird der Strahlungsantrieb von Ozonänderungen durch höhere Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen am Boden getrieben, ist die Ozonrückkopplung ebenfalls negativ. Dennoch erhöht sich die Klimasensitivität, da Änderungen der physikalischen Rückkopplungen den Primäreffekt dominieren.
- Ein weiterentwickeltes Klima-Chemie-Modell kann auch Methan- und N₂O-Rückkopplungen analog quantifizieren.